

УДК 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРИНГА ПАРОВОГО ВЗРЫВА ПРИ РАСПАДЕ СТРУИ РАСПЛАВЛЕННОЙ СОЛИ

© 2024 г. Н. В. Васильев^{1,2,*}, С. Н. Вавилов^{1,**}, Е. А. Лиджиев^{1,2,***}

Представлено академиком РАН О.Ф. Петровым 11.04.2024 г.

Поступило 15.04.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принято к публикации 18.06.2024 г.

Представлено экспериментальное исследование с помощью высокоскоростной видеосъемки процесса парового взрыва на дробящейся струе расплавленной соли NaCl в воде. Исследованы режимы распада струи на крупные части, сопровождающиеся отрывом мелких капель-сателлитов. Впервые в лабораторных условиях воспроизведено и зафиксировано распространение парового взрыва на двух крупных фрагментах распада струи вследствие самопроизвольного триггеринга процесса на капле-сателлите. Показана возможность возникновения парового взрыва на начальном этапе первой стадии грубого дробления и перемешивания струи расплава.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, распад струи, капля-сателлит, триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

DOI: 10.31857/S2686740024040013, EDN: JРQMEM

Взаимодействие высокотемпературных струй расплавов с водой, при котором с очень высокой скоростью происходит образование больших объемов пара, называется паровым взрывом [1–4]. Это потенциально крайне опасное явление возможно при авариях на атомных электростанциях, в металлургической и целлюлозно-бумажной промышленности и др. Обычно на первом этапе процесса парового взрыва (премиксинга) происходит гидродинамический распад струи расплавленного вещества на отдельные капли (с размерами ~1 см) [5]. Затем после резкого парообразования на одной из капель (триггеринга), спровоцированного, по всей видимости, локальным касанием воды

и расплава в результате колебаний толщины паровой пленки, процесс распространяется на все соседние капли. В наших предыдущих работах [6, 7] с помощью высокоскоростной видеосъемки (метода, успешно используемого в исследованиях в данной области [8–11]) было впервые зафиксировано такое распространение парового взрыва между отдельными каплями расплава.

В работе [12] с помощью видеосъемки в определенных диапазонах чисел Рейнольдса и Онезорге были показаны режимы дробления жидкой струи в другой жидкости на крупные части с размерами порядка ее диаметра, сопровождающиеся отрывом небольших капель «сателлитов» с диаметром примерно на порядок ниже. На этих каплях-сателлитах потенциально более вероятен самопроизвольный триггеринг парового взрыва, который провоцирует дальнейшее распространение процесса на соседние крупные фрагменты распада струи.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования с помощью

¹Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

*E-mail: nikvikvas@mail.ru

**E-mail: sergeynv@mail.ru

***E-mail: lind722k@gmail.com

высокоскоростной видеосъемки механизма распространения самопроизвольного триггеринга парового взрыва при распаде струи расплава соли NaCl в воде при режимах, сопровождающихся формированием капле-сателлитов. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [6, 7]. Исследовался процесс парового взрыва при распаде струи расплава NaCl массой 5–6 г с температурой $t_{\text{NaCl}} = 1000\text{--}1100^\circ\text{C}$, падающей в емкость с дистиллированной водой объемом 20 л с температурой $t_{\text{в}} = 20\text{--}25^\circ\text{C}$ с высоты примерно 70–80 мм. Диаметр отверстия для выхода струи из графитового тигля, в котором посредством индукционного нагрева производилось расплавление соли, составлял 4 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Иллюстрация наблюдаемого в опытах процесса представлена на рис. 1 и видеосъемке из приложенного файла (с частотой кадров 77 кГц). На рис. 1 можно видеть момент распада струи расплава NaCl в воде на две крупные части (рис. 1а) с формированием капли-сателлита (отмечена белой стрелкой на рис. 1б). От момента погружения струи в воду до первого кадра на рис. 1 прошло ~ 85 мс. Диаметр капли-сателлита составил $d_{\text{сат}} \approx 0.43$ мм, что соответствует примерно десятой части от диаметра струи (диаметр струи принимался равным диаметру отверстия тигля – 4 мм).

Числа подобия для струи в приведенном эксперименте имели значения: число Рейнольдса $Re = 2070$, число Онезорге $Oh = 1.4 \cdot 10^{-3}$, что по [12] соответствуют типичным режимам распада струи на крупные фрагменты с образованием капле-сателлитов. Расчет чисел подобия проводился по формулам: $Re = \rho v d / \mu$, $Oh = \mu / (\rho \sigma d)^{0.5}$, где ρ , v , d , μ , σ – соответственно плотность, скорость, диаметр, коэффициент динамической вязкости и коэффициент поверхностного натяжения для струи расплава. Физические свойства расплава NaCl (ρ , σ) рассчитывались по формулам из [13]. Скорость движения струи оценивалась по кадрам видеосъемки и составила $v = 0.4$ м/с.

Описание типичного протекания процесса в проведенных экспериментах представлено

ниже. Через небольшое время после распада струи (в эксперименте на рис. 1 это время составило ~ 1.5 мс) на капле-сателлите начинаются колебания толщины паровой пленки (более детально это можно увидеть на видео из приложенного файла) со скоростью порядка 10 м/с. Причем амплитуда и период (τ) с каждым последующим колебанием возрастают (табл. 1), что, по всей видимости, является следствием процесса постепенной фрагментации капли, ведущего к увеличению площади контакта расплава с водой. В качестве параметра амплитуды использовался максимальный диаметр капли (d_{max}), покрытой паровой оболочкой, за период колебания. Заметим, что колебания толщины паровой пленки на одиночных расплавленных каплях перед паровым взрывом отмечались также в [8, 14].

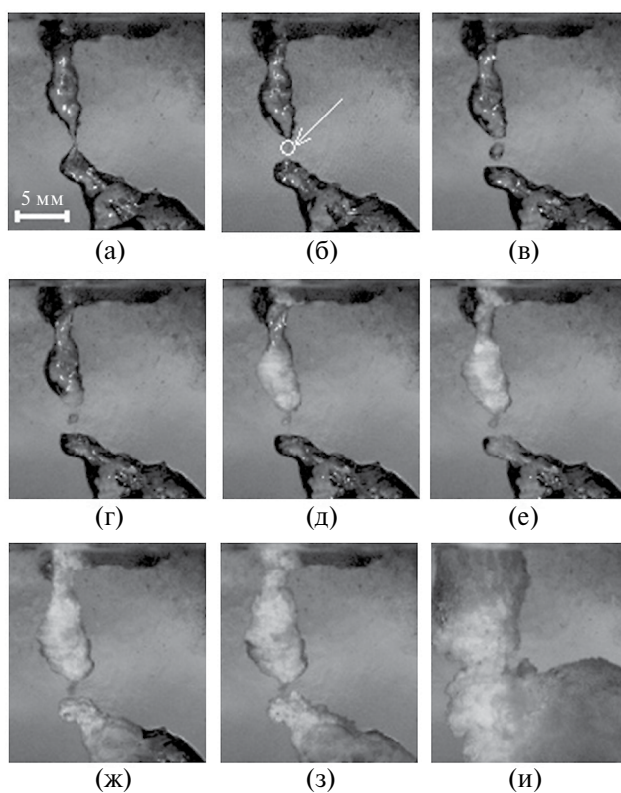


Рис. 1. Распространение парового взрыва при распаде струи расплавленной соли NaCl в воде (температура воды $t_{\text{в}} = 23^\circ\text{C}$, температура соли в тигле $t_{\text{NaCl}} = 1100^\circ\text{C}$, числа подобия для струи $Re = 2070$, $Oh = 1.4 \cdot 10^{-3}$). Время экспозиции – 4.5 мкс. Время от кадра момента распада струи (а): 1.11 мс (б); 1.87 (в); 1.99 (г); 2.02 (д); 2.03 (е); 2.05 (ж); 2.08 (з); 2.34 мс (и). Белой стрелкой обозначена капля-сателлит, образовавшаяся при распаде струи. Верхняя граница кадров соответствует уровню воды в емкости.

Таблица 1. Параметры последовательных колебаний толщины паровой пленки на капле-сателлите

Параметры	Первое колебание	Второе колебание	Третье колебание
d_{\max} , мм	0.60	0.85	1.70
τ , мкс	40	65	140

На кадре (рис. 1в) представлен момент достижения капель-сателлитом максимального диаметра во время третьего цикла колебаний толщины паровой пленки на ней. По-видимому, импульса давления в жидкости, сформированного вследствие резкого парообразования во время третьего цикла, оказалось достаточно для сначала локального контакта воды с расплавом на верхнем крупном фрагменте распавшейся струи (рис. 1г) и последующего распространения парового взрыва по всей его поверхности (рис. 1г–ж). Что затем спровоцировало аналогичные процессы на нижнем фрагменте (рис. 1е–з).

ВЫВОДЫ

В работе впервые с помощью высокоскоростной видеосъемки зафиксировано распространение парового взрыва на два крупных фрагмента распада расплавленной струи в результате импульса давления, спровоцированного самопроизвольным триггерингом на мелкой капле-сателлите (с размером на порядок ниже). Данный процесс наблюдался при типичных режимах распада струи на крупные части, сопровождающихся отрывом мелких капель, при определенных диапазонах чисел Re и Oh . Таким образом, показана возможность возникновения парового взрыва еще на начальном этапе первой стадии (премиксинга) принятой последовательности его развития.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01062, <https://rscf.ru/project/23-79-01062/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt–Water Interactions // *Advances in heat transfer*. 1997. V. 29. P. 129–213. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70185-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0)
2. Berthoud G. Vapor explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. № 1. P. 573–611. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573>
3. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 2. С. 280–318. <https://doi.org/10.31857/S0040364422020284>
4. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Волков Г.Ю., Якуш С.Е., Салех Б. Моделирование струйного истечения жидкости в затопленное пространство методом VOF // *Теплоэнергетика*. 2023. № 1. С. 75–86. <https://doi.org/10.56304/S0040363622120050>
5. Ивочкин Ю.П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дис. ... докт. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2015.
6. Клименко А.В., Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Скибин Д.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения стадии спонтанного триггеринга процесса // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2022. Т. 503. С. 13–16. <https://doi.org/10.31857/S2686740022010084>
7. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. Визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва // *Научная визуализация*. 2023. Т. 15. № 2. С. 38–44. <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.04>
8. Manickam L., Qiang G., Ma W., Bechta S. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions // *Experimental Heat Transfer*. 2019. V. 32. № 3. P. 251–266. <https://doi.org/10.1080/08916152.2018.1505786>
9. Simons A., Bellemans I., Crivits T., Verbeken K. The effect of vapour formation and metal droplet temperature and mass on vapour explosion behavior // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. V. 196. 123289. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123289>
10. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Эволюция формы последовательных каверн импакта свободно падающей капли // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2022. Т. 502. С. 36–44. <https://doi.org/10.31857/S2686740021060055>
11. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Перенос вещества капли при формировании первичной каверны // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2023. Т. 508. С. 42–52. <https://doi.org/10.31857/S2686740022060062>
12. Saito S., Abe Y., Koyama K. Flow transition criteria of a liquid jet into a liquid pool // *Nuclear*

- engineering and design. 2017. V. 315. P. 128–143.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.011>
13. *Катышев С.Ф., Десятник В.Н.* Плотность и поверхностное натяжение расплавов системы NaF–NaCl–ZrF₄ // Атомная энергия. 1998. Т. 84. № 1. С. 61–64.
14. *Hansson R.C., Dinh T.N., Manickam L.T.* A study of the effect of binary oxide materials in a single droplet vapor explosion // Nuclear Engineering and Design. 2013. V. 264. P. 168–175.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.017>

EXPERIMENTAL STUDYING OF VAPOR EXPLOSION TRIGGERING DURING THE BREAKUP OF A MOLTEN SALT JET

N. V. Vasil'ev^{a,b}, S. N. Vavilov^a, E. A. Lidzhiev^{a,b}

^a*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS O. F. Petrov

The paper presents an experimental study using high-speed video recording of the process of vapor explosion on a breakup jet of molten NaCl salt in water. The regimes of jet breakup into large parts, accompanied by the separation of small satellite droplets, have been studied. For the first time, the propagation of a vapor explosion on two large fragments of jet breakup due to spontaneous triggering of the process on a droplet-satellite was reproduced and recorded under laboratory conditions. The possibility of a vapor explosion occurring at the initial stage of the first stage of coarse crushing and mixing of the melt jet is shown.

Keywords: vapor explosion, subcooled water, molten salt, jet breakup, droplet-satellite, triggering, high speed video recording